

Entwicklung eines Echtzeit-Antischall-Systems für Feuerwehrhelme

Anton Namenas¹, Seedo Eldho Paul¹, Gerhard Schmidt¹, Michael Brodersen²

¹ *Digitale Signalverarbeitung und Systemtheorie, CAU Kiel, Email: {ann, stu128352, gus}@tf.uni-kiel.de*

² *Dräger Safety AG & Co. KGaA, 23560 Lübeck, Deutschland, Email: Michael.Brodersen@draeger.com*

Kurzfassung

In einem Einsatz ist die Feuerwehr diversen akustischen Lärmquellen ausgesetzt. Aufgrund des breiten Spektrums der Feuerwehrausrüstung können auch die Geräusche unterschiedlichster Art sein. Eine übermäßige Lärmeinwirkung kann zu verschiedenen gesundheitlichen Problemen führen und bedingt durch den erhöhten Stresspegel sich ungünstig auf den Feuerwehreinsatz auswirken. Gleichzeitig erschweren die Umgebungsgereusche die Verständigung unter den Feuerwehrmännern. Um dem entgegenzuwirken, werden schon heute diverse Kommunikationssysteme, vor allem in Atemschutzmasken, eingesetzt. Dabei wird häufig versucht durch verstärkte Sprachwiedergabe die Verständlichkeit zu verbessern, was natürlich den Gesamtschalldruckpegel erhöht. Als Alternative zu solchen Systemen bietet sich die Anwendung von aktiven Antischallsystemen in Kombination mit Kommunikationseinheiten an.

Diese Arbeit präsentiert ein Echtzeitantischallsystem zur Geräuschunterdrückung in Feuerwehrhelmen. Das System ist auf der Basis eines zweikanaligen Filtered-x Least-Mean-Square (Fx-LMS) Algorithmus aufgebaut. Im Fokus dieser Arbeit steht die Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von aktiven Antischallsystemen in Feuerwehrhelmen.

Einleitung

Aktive Antischallsysteme (*engl. Active Noise Cancellation [ANC]*) nutzen das Prinzip der destruktiven Interferenz, um ein vorhandenes Schallfeld an einem bestimmten Ort, durch Erzeugung eines Gegenschalls, zu eliminieren. Der Antischall entspricht dabei dem Störschall mit gleicher Amplitude und entgegengesetzter Phase. Das ANC-Prinzip wurde schon in den 1930er in den Patenten von Henry Coanda (1934) [1] und Paul Lueg (1936) [2] beschrieben. Das von Lueg dargestellte System bestand aus einem Mikrophon, einem Verstärker und einem Lautsprecher. Nach wie vor sind dies die wichtigsten Bestandteile eines Antischallsystems. Nach damaligem Stand der Technik fand diese Erfindung jedoch keine reelle Anwendung. Praktische Realisierungen wurden erst in den 1980er Jahren mit der Entwicklung leistungsfähiger Signalprozessoren und adaptiver Signalverarbeitungsalgorithmen möglich.

Heute finden aktive Antischallsysteme vermehrt den Einsatz in Sicherheitsausrüstung, wie zum Beispiel in Feuerwehrhelmen.

Im Folgenden wird ein erster Prototyp eines Feuerwehrhelms mit einem integrierten Antischallsystem vorgestellt. Zunächst wird am Beispiel einer einkanaligen

ANC-Struktur die Funktionsweise des Systems beschrieben. Danach wird die Struktur zu einem zweikanaligen System erweitert und die damit verbundenen Herausforderungen und deren Lösungsansätze erläutert. Anschließend wird eine alternative Methode für effiziente Filterung im Frequenzbereich dargestellt. Zum Schluss werden die Ergebnisse präsentiert und ein kurzer Ausblick gegeben.

Feed-forward ANC

Für den Feuerwehrhelm wurde die sogenannte Feed-forward Struktur verwendet, siehe Abb. 1. Diese besteht aus zwei Mikrophonen und einem Lautsprecher. Das Referenzmikrophon nimmt das Umgebungsgereusch $x(n)$ und das Fehlermikrophon das Restgeräusch $e(n)$ auf. Beide Signale werden der Signalverarbeitungseinheit zugeführt, die ihrerseits das Antischallsignal $y(n)$ berechnet, welches dann über einen Lautsprecher ausgegeben wird. Die Überlagerung des an dem Fehlermikrophon ankommenden Störsignals und des Antischallsignals führt schließlich zur Auslöschung der beiden Signale. Das Fehlersignal wird zur Adaption des internen Filters genutzt, mit dem Ziel das Fehlersignal $e(n)$ zu minimieren [3].

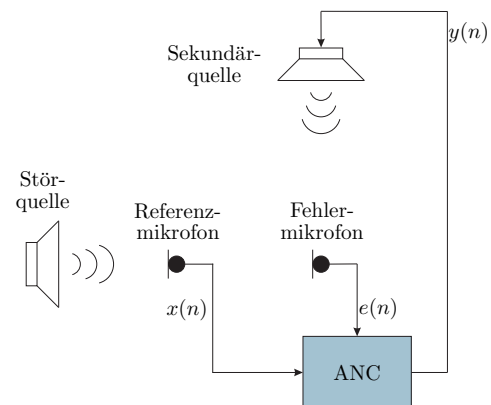


Abbildung 1: Einkanaliges Feed-forward ANC-System.

Das ANC-System stellt eine digitale Abbildung der akustischen Pfade in Form von adaptiven Filtern dar. Unter anderen sind das der primäre Pfad zwischen dem Referenzmikrophon und dem Fehlermikrophon und der sekundäre Pfad zwischen dem Lautsprecher (Sekundärquelle) und dem Fehlermikrophon (siehe nächster Abschnitt). Dementsprechend muss das System in der Lage sein die Filter zu schätzen und im Falle zeitvarianter Pfade diese auch nachführen zu können. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Laufzeit des gesamten Systems, diese muss kleiner sein als die Laufzeit des primären Pfades. Wird diese Voraussetzung nicht eingehalten, verschlechtert sich

die Performanz des Antischallsystems und es können nur schmalbandige oder periodische Signale unterdrückt werden [4]. In einem ANC-System sind es vor allem die Faltungsoperationen, die einen wesentlichen Einfluss auf die Bearbeitungszeit haben.

Fx-LMS

Der zur Nachführung der Filterkoeffizienten am häufigsten verwendete Algorithmus ist das stochastische Gradientenverfahren, auch als Least Mean-Square Algorithmus (LMS) bekannt. Der LMS-Algorithmus wurde von beiden US-Wissenschaftlern, Bernard Widrow und Marcian Edward Hoff, im Jahre 1960 beschrieben [5]. Neben der einfachen Implementierung besitzt der Algorithmus einen weiteren Vorteil. Es kann gezeigt werden, dass der Erwartungswert der Filterkoeffizienten, die durch den LMS-Algorithmus eingestellt werden, gegen die Wienerfilter-Lösung konvergiert, welche die optimale Lösung darstellt [3].

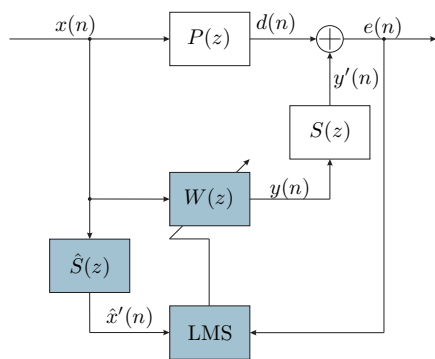


Abbildung 2: Blockdiagramm eines ANC-Systems mit Fx-LMS-Algorithmus.

In der Abb. 2 ist ein auf dem LMS-Prinzip basierendes Feed-forward ANC-System dargestellt. Dabei steht $P(z)$ für die Z-Transformierte der Übertragungsfunktion des primären Pfades und $S(z)$ für die Übertragungsfunktion des sekundären Pfades. $W(z)$ stellt die Schätzung des primären Pfades und $\hat{S}(z)$ die des sekundären Pfades dar. Neben den akustischen Pfaden beinhalten diese Übertragungsfunktionen auch die von dem ANC-System abhängigen elektrischen Pfade, wie zum Beispiel die Lautsprecher- und Mikrofoncharakteristik.

Anders als bei dem LMS-Algorithmus befinden sich zwei zusätzliche Übertragungsfunktionen $S(z)$ und $\hat{S}(z)$ in dem Blockschaltbild, diese müssen bei der Berechnung des Filters $W(z)$ mitberücksichtigt werden.

Die Z-Transformierte des Fehlersignal $e_{\text{LMS}}(n)$ des LMS-Algorithmus ist wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} E_{\text{LMS}}(z) &= D(z) - Y(z) \\ &= D(z) - X(z)W(z). \end{aligned} \quad (1)$$

Dagegen berechnet sich das Fehlersignal $e_{\text{ANC}}(n)$ des ANC-Systems wie folgt:

$$\begin{aligned} E_{\text{ANC}}(z) &= D(z) - Y'(z) \\ &= D(z) - X(z)W(z)S(z). \end{aligned} \quad (2)$$

Damit das Fehlersignal und das Referenzsignal $x(n) = \mathcal{Z}^{-1}\{X(z)\}$ aneinander zeitlich angepasst bleiben, muss das Referenzsignal zuvor mit dem Filter $S(z)$ gefiltert werden:

$$X'(z) = X(z)S(z). \quad (3)$$

Da die Übertragungsfunktion $S(z)$ jedoch unbekannt ist, muss $X'(z)$ mit Hilfe der geschätzten Übertragungsfunktion $\hat{S}(z)$ approximiert werden:

$$X'(z) \approx X(z)\hat{S}(z) = \hat{X}'(z). \quad (4)$$

Mit den Gleichungen 2 und 4 lässt sich der Aktualisierungsalgorithmus wie folgt angeben

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - 2\mu e(n)\hat{\mathbf{x}}'(n), \quad (5)$$

wobei $\mathbf{w}(n)$ einen Vektor mit L Filterkoeffizienten und $\hat{\mathbf{x}}'(n)$ ein Vektor mit L Signalwerten des gefilterten Referenzsignals darstellen:

$$\mathbf{w}(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ \dots \ w_{L-1}(n)]^T, \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{x}}'(n) = [\hat{x}'(n) \ \hat{x}'(n-1) \ \dots \ \hat{x}'(n-L+1)]^T. \quad (7)$$

Der Faktor μ ist die sogenannte Schrittweite.

Das oben beschriebene LMS-Verfahren wird als Filtered-X Least Mean-Square Algorithmus bezeichnet. Es wurde von Widrow [6] und Burgess [7] unabhängig von einander beschrieben.

Schätzung des sekundären Pfades

Wie oben beschrieben, benötigt das Fx-LMS-Verfahren die geschätzte Übertragungsfunktion des sekundären Pfades $\hat{S}(z)$. Die Schätzung kann sowohl online als auch offline geschehen. Eine offline-Schätzung kann verwendet werden, um den sekundären Pfad während einer Initialisierungsphase zu schätzen. Die Übertragungsfunktion $\hat{S}(z)$ bleibt danach konstant und kann von dem ANC-System benutzt werden. Diese Art von Schätzung kann nur im Falle eines zeitinvarianten sekundären Pfades benutzt werden. Bei der Online-Schätzung werden die Filterkoeffizienten im Laufe des ANC-Prozesses aktualisiert, somit können auch zeitvariante Pfade geschätzt werden. Die Online-Schätzung erhöht jedoch die Komplexität und somit die Rechenlast. Näheres zu den beiden Verfahren ist in [3] und [5] zusammengefasst.

Zweikanaliges ANC-System

Um das einkanalige ANC-System in ein Feuerwehrlärm integrieren zu können, muss es auf zwei Kanäle erweitert werden. In der Abb. 3 ist das zugehörige Blockdiagramm eines Zweikanal-ANC-Systems dargestellt. Wie zu erkennen besitzt das System nun zwei primäre Pfade $P_L(z)$ und $P_R(z)$ und zwei sekundäre Pfade $S_L(z)$ bzw. $\hat{S}_L(z)$ und $S_R(z)$ bzw. $\hat{S}_R(z)$. Neben den sekundären Pfaden entstehen in einem Zweikanal-ANC-System zusätzlich zwei Kreuzpfade $S_{LR}(z)$ und $S_{RL}(z)$ und ihre geschätzten Übertragungsfunktionen $\hat{S}_{LR}(z)$ und $\hat{S}_{RL}(z)$. Die Kreuzpfade entstehen jeweils zwischen dem linken Lautsprecher und dem rechtem Fehlermikrofon und zwischen dem

rechten Lautsprecher und dem linken Fehlermikrofon. Alle sekundären Pfade können, entweder offline oder online geschätzt werden (siehe vorheriger Abschnitt).

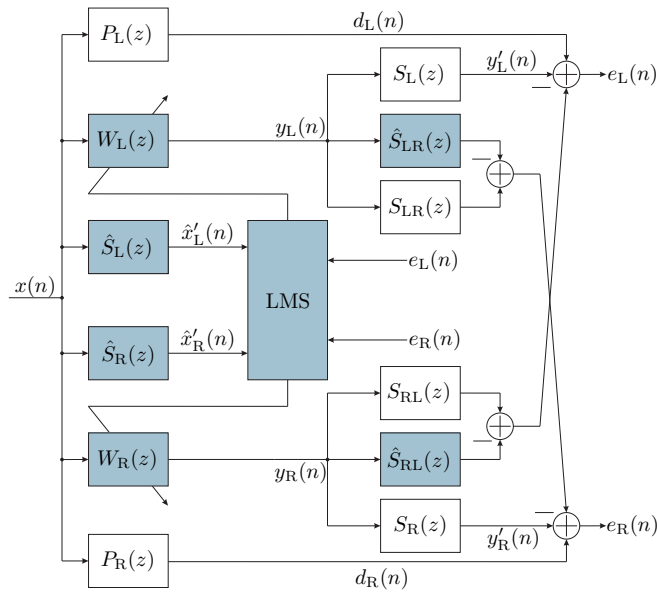


Abbildung 3: Blockdiagramm eines zweikanaligen ANC-Systems mit Fx-LMS-Algorithmus.

Um die unerwünschte Kreuzkopplung zwischen den Lautsprechern und den Fehlermikrofonen zu beseitigen, können die geschätzten Übertragungsfunktionen benutzt werden, um die gegenseitige Beeinflussung zu neutralisieren, siehe Abb. 3.

Zwei weitere Rückkopplungspfade, die in der Abbildung nicht dargestellt sind, entstehen zwischen den beiden Lautsprechern und dem Referenzmikrofon. Diese akustischen Kopplungen können zur Destabilisierung des ANC-Systems führen und müssen ggf. kompensiert werden [3].

Gemischte Filterung

Die Hauptoperation des ANC-Algorithmus, die eine hohe Rechenlast verursacht, ist die Faltung der Signale mit den Filterkoeffizienten im Zeitbereich. Dies macht sich vor allem dann bemerkbar, wenn die Anzahl der benötigten Filterkoeffizienten zunimmt. Die in diesem Abschnitt vorgestellte gemischte Faltung (*engl. Mixed-domain Filtering*) wurde von W. G. Gardner vorgestellt [9]. Der Hauptgedanke der gemischten Faltung, ist die Unterteilung der Faltungsoperation in zwei Teile. Der erste Teil der Faltung, mit nur wenigen Filterkoeffizienten, wird im Zeitbereich durchgeführt und der Rest blockweise im Frequenzbereich, siehe Abb. 4. Im ersten Schritt werden die Filterkoeffizienten $w_l(n)$, mit $l \in \{0, 1, \dots, L-1\}$ in M Blöcke $\mathbf{w}_m(n) = \mathcal{Z}^{-1}\{\mathbf{W}_m(z, n)\}$, mit $m \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ unterteilt, dabei hat der erste Block die Länge $2R$ und die restlichen jeweils die Länge R , so dass die Gesamtanzahl der Koeffizienten sich zu $L = (M+1)R$ ergibt.

$$\mathbf{w}_0(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ \dots \ w_{2R-1}(n)]^T, \quad (8)$$

$$\mathbf{w}_m(n) = [w_{mR}(n) \ w_{mR+1}(n) \ \dots \ w_{mR+R-1}(n)]^T, \quad m \in [1 \dots M-1]. \quad (9)$$

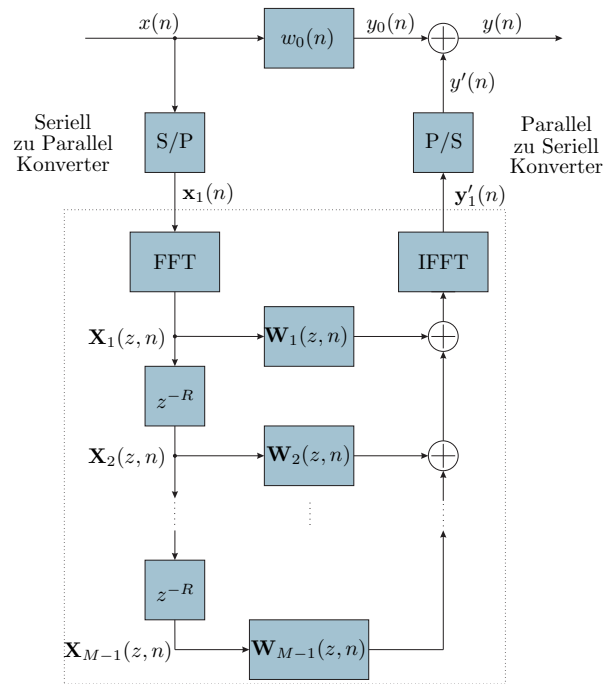


Abbildung 4: Blockdiagramm der gemischten Faltung im Zeit- und Frequenzbereich.

Damit ergibt sich für den Ausgang $y(n)$ der Faltung folgender Zusammenhang

$$\begin{aligned} y(n) &= y_0(n) + y'(n) \\ &= \mathbf{w}_0(n)^T \mathbf{x}_0(n) + \sum_{m=1}^{M-1} \mathbf{w}_m(n)^T \mathbf{x}_m(n), \end{aligned} \quad (10)$$

wobei die Vektoren $\mathbf{x}_0(n)$ und $\mathbf{x}_m(n)$ ähnliche Aufteilung aufweisen wie die Filtervektoren:

$$\mathbf{x}_0(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-2R+1)]^T, \quad (11)$$

$$\mathbf{x}_m(n) = [x(n-(m+1)R) \ \dots \ x(n-(m+2)R+1)]^T, \quad m \in [1 \dots M-1]. \quad (12)$$

Der Ausdruck $\mathbf{w}_0(n)^T \mathbf{x}_0(n)$ wird dabei im Zeitbereich berechnet und der Letzte blockweise im Frequenzbereich:

$$\mathbf{Y}'(z, n) = \mathcal{Z}\{y'(n)\} = \sum_{m=1}^{M-1} \mathcal{Z}\{\mathbf{w}_m(n)\} \mathcal{Z}\{\mathbf{x}_m(n)\}. \quad (13)$$

Während die Zeitbereichsfaltung mit jedem neu ankommenden Signalwert durchgeführt wird, kann die Frequenzbereichsfaltung parallel in einem eigenen Thread mit niedriger Priorität durchgeführt werden. In diesem Fall kann die gesamte Faltung ohne zusätzliche Zeitverzögerung durchgeführt werden.

Hardware

Antischallsysteme benötigen eine geringe Verzögerung zwischen dem Eingang und dem Ausgang, um das Störsignal zuverlässig zu unterdrücken. Für diesen Zweck wurde das eingebettete System namens Bela-Board

gewählt [10]. Es besteht aus einem Einplatinencomputer (BeagleBone Black) und einer Erweiterungsplatine mit mehreren Audioein- und -ausgängen. Das Board erreicht eine Latenz unter einer Millisekunde [11].

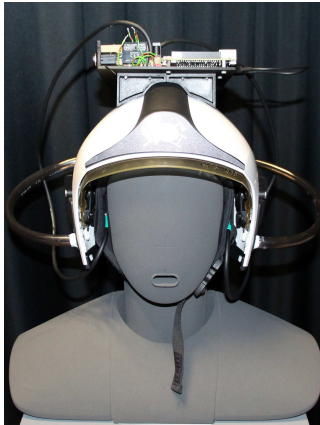


Abbildung 5: Prototyp eines Feuerwehrhelms mit integriertem ANC-System.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine Zeitbereichsimplementierung des oben beschriebenen Fx-LMS-Algorithmus mit einer Offline-Sekundärpfadmodellierung auf dem Bela-Board umgesetzt. Die Schätzung der sekundären Pfade und der Kreuzpfade erfolgt während der Initialisierungsphase. Die gemessene durchschnittliche Reduktion des Restgeräusches an den Ohren beträgt 23 dB, siehe Abb. 6 und 7. Für eine bessere Geräuschreduktion sind die Fehlermikrofone so nah wie möglich an den Ohren zu platzieren.

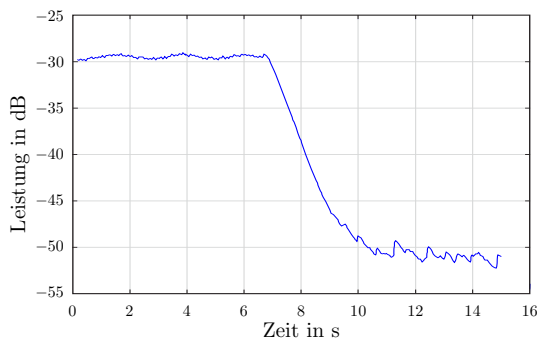


Abbildung 6: Mittlere Fehlerleistung am rechten Fehlermikrofon.

Der Feuerwehrhelm mit einem integrierten Antischallsystem liefert vielversprechende Ergebnisse, jedoch funktioniert das verwendete System nur bei monofrequenten bzw. schmalbandigen Störsignalen und nur mit relativ kurzen Filterlängen (primärer Pfad 600 Koeffizienten, sekundäre Pfade 100 Koeffizienten). Um das ANC-System in dieser Hinsicht zu verbessern, sollte die oben dargestellte gemischte Filterung umgesetzt werden. Diese verspricht eine deutliche Verbesserung der Rechenzeit und die Möglichkeit der Verwendung größerer Filterlängen. Was die Kombination von ANC-Systemen mit Kommunikationssystemen angeht, muss eine Lösung gefunden werden, die es möglich macht ungewollte Störsignale von

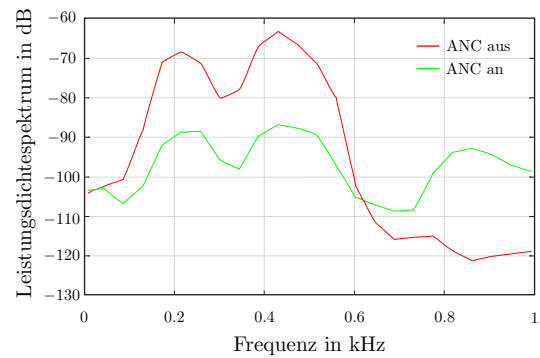


Abbildung 7: Leistungsdichtespektrum am rechten Ohr (Störsignal bei 220 Hz und 440 Hz).

Sprachsignalen zu unterscheiden, um die Kommunikation zwischen Feuerwehrleuten und zu den Zivilisten zu gewährleisten.

Literatur

- [1] M. H. Coanda, *Procédé et dispositif de protection contre les bruits*, French Patent January 1934
- [2] P. Lueg, *Process of Silencing Sound Oscillations*, US Patent 1936
- [3] S. M. Kuo, D. R. Morgan, *Active Noise Control Systems Algorithms and DSP Implementation*, volume 1. Wiley-Interscience, 1996
- [4] S. M. Kuo, D. R. Morgan, *Active noise control: a tutorial review*, Proceedings of the IEEE, 87(6):943–973, Jun 1999
- [5] B. Widrow, S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985
- [6] B. Widrow, D. Shur, S. Shaffer, *On adaptive inverse control*, Proc. 15th Asilomar Conf., pages 185–189, 1981
- [7] J. C. Burgess, *Active adaptive sound control in a duct: A computer simulation*, J. Acoust. Soc. Amer., 70:715–726, Sept. 1981
- [8] J. J. Shynk, *Frequency-domain and multirate adaptive filtering*, IEEE Signal Processing Magazine, 9(1):14–37, Jan 1992
- [9] W. G. Gardner, *Efficient convolution without input-output delay*, Journal of the Audio Engineering Society, 43(3):127–135, March 1995
- [10] Giulio Moro, 2017, URL: <https://github.com/BelaPlatform/Bela/wiki>
- [11] Giulio Moro, 2017, URL: <https://github.com/BelaPlatform/Bela/wiki/What-is-Bela%3F>